

9701593



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

B 2



Veröffentlichungsnummer: **0 513 410 A1**

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 91107831.9

(51) Int. Cl.⁵ H01L 25/07, H01L 21/50

(22) Anmeldetag: 15.05.91

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
19.11.92 Patentblatt 92/47

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB IT

(71) Anmelder: **ABB-IXYS Semiconductor GmbH**
Edisonstrasse 15
W-6840 Lampertheim(DE)

(72) Erfinder: **Neidig, Arno, Dr.**
Brühlerweg 42
W-6831 Plankstadt(DE)
Erfinder: **Hettmann, Hubert**
Waldstrasse 16
W-6832 Hockenheim(DE)

(74) Vertreter: **Rupprecht, Klaus, Dipl.-Ing. et al**
c/o ABB Patent GmbH, Postfach 10 03 51
W-6800 Mannheim 1(DE)

(54) Leistungshalbleitermodul und Verfahren zur Herstellung eines solchen Moduls.

(57) Die Erfindung bezieht sich auf ein Leistungshalbleitermodul mit Kunststoffgehäuse und nach außen führenden Anschlußelementen. Anstelle der nach dem Stand der Technik üblichen Fixierung der Anschlußelemente im Gehäuse mittels einer aushärtenden Vergußmasse wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, die Anschlußelemente (3,20) durch Kunststoffteile (25,28) zu fixieren, die Teil von Anformungen im Kunststoffgehäuse (2) sind und in einem Ultraschallschweißprozeß während der Modulherstellung verformt werden.

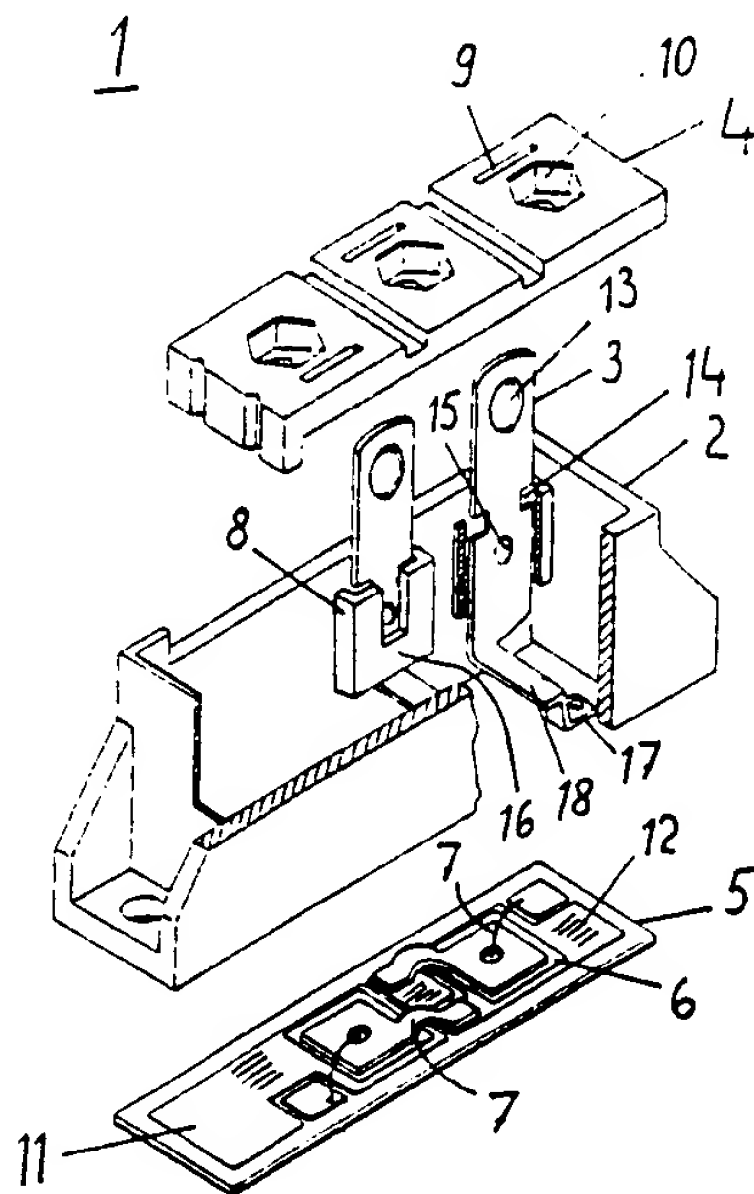


Fig 1

EP 0 513 410 A1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Leistungshalbleitermodul mit Kunststoffgehäuse und mit nach außen führenden elektrischen Anschlußelementen, sowie auf ein Verfahren zur Herstellung des Leistungshalbleitermoduls.

Leistungshalbleitermodule sind in der üblichen Anwendung in elektrischen Geräten oder Anlagen über externe Anschlußleitungen mit anderen Komponenten des Gerätes oder der Anlage verbunden. Die externen Anschlußleitungen können mit erheblichen Zug- und Druckkräften über die elektrischen Anschlußelemente des Moduls auf Lötanschlußflächen im Modulinneren wirken und dort Schäden herbeiführen. Um eine solche Krafteinwirkung auf die Lötanschlüsse zu verhindern, ist es Stand der Technik die äußeren Anschlüsse dadurch zu fixieren, daß in einem letzten Herstellungsschritt eine steif aushärtende Vergußmasse in das Gehäuse gefüllt wird. Dieser Prozeß erfolgt nach dem Verkleben des Gehäuses mit einer Grundplatte und nach dem Einfüllen einer relativ dünnen Schicht einer elastischen Weichvergußmasse auf Silikonbasis zum Schutz empfindlicher Verbindungsteile, wie z.B. Bonddrähte oder Halbleiterchips.

Aus der DE-OS 37 17 489 ist ein Leistungshalbleitermodul mit Kunststoffgehäuse bekannt, von dem die Erfindung ausgeht. Das daraus bekannte Leistungshalbleitermodul hat ein Kunststoffgehäuse mit Führungsschächten oder Ausnehmungen, die während der Modulherstellung als Lötform für Bauteile, auch für nach außen führende elektrische Anschlußelemente, wirken. Die in der DE-OS 37 17 489 vorgeschlagenen Maßnahmen entlasten jedoch nicht die Lötanschlußflächen im Modulinneren. Deshalb wird auch dieses bekannte Modul mit einer Hartvergußmasse, z.B. einem Epoxidharz ausgefüllt.

Das Vergießen mit einer aushärtenden Vergußmasse hat mehrere Nachteile:

a) Die Handhabung der meist zweikomponentigen, nämlich aus Harz und Härter bestehenden Epoxidharze in der Fertigung, ist nicht einfach. Epoxide dürfen in nichtausgehärtetem Zustand nicht mit der Haut in Berührung kommen. Die Vergußmassen müssen in der Regel heiß verarbeitet werden um die notwendige Fließfähigkeit zu erreichen. Anschließend muß die Vergußmasse bei etwa 130°C in einem Ofen mehrere Stunden ausgehärtet werden, bis die nötige Festigkeit erreicht ist. Hierzu sind Kammeröfen erforderlich. Wegen der langen Prozeßzeiten sind keine Durchlaufverfahren möglich; dies ist ein Nachteil, wenn hohe Stückzahlen zu fertigen sind.

b) Das Vergießen mit Epoxidharz ist ein relativ schmutziger Prozeß. Epoxidharze sind bedingt durch den Herstellungsprozeß unrein, d.h. sie enthalten Chlor- und Natriumionen. Die Ionen

können auch nach dem Aushärten in der Vergußmasse unter dem Einfluß elektrischer Felder wandern und die elektrischen Kennlinien von Bauelementen verändern. Es werden zwar auch weitgehend gereinigte Vergußmassen angeboten, die jedoch entsprechend teuer sind. In der Regel werden noch Zusätze, wie Flammenschutzmittel, Flexibilisatoren und mineralische Füllstoffe dem Harz beigemischt, um bestimmte Vorschriften zu erfüllen und um bessere mechanische Eigenschaften einzustellen. Durch die Füllstoffe wird es jedoch eher schwieriger die außerdem bestehenden Reinheitsanforderungen zu erfüllen.

c) Ein weiterer Nachteil der Vergießharze ist ihr beträchtlicher Schrumpf beim Aushärten und der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient, der nur begrenzt durch mineralische Füllstoffe verringert werden kann. Beim Abkühlen von der Aushärtetemperatur herunter auf Raumtemperatur kommt es daher zu mechanischen Verspannungen, die sich negativ auf die Geometrie und die Stabilität des Kunststoffgehäuses auswirken können.

d) Werden im Modul beispielsweise zusätzliche Schaltungsebenen integriert, wie in der nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldung P 40 20 849.4 vorgeschlagen wird, dann ist die zusätzliche Hartvergußmasse störend. Denn die empfindlichen Bauteile der Platinen, z.B. in Oberflächenmontagetechnik, sollten nicht im Hartverguß eingebettet werden, da sie sonst wegen des Schrumpfes und wegen der hohen thermischen Dehnung des Hartvergusses von der Platine an den Lötverbindungen abgerissen werden könnten. Alternativ müßte man die Modulhöhe vergrößern, um noch im Weichvergußbereich für die zusätzliche Platine Platz zu schaffen. Ein höheres Modul erfordert jedoch nicht nur einen höheren Materialaufwand, sondern verbietet sich im allgemeinen auch wegen Überschreitung der für die jeweilige Gehäuseform genormten Bauhöhe.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Leistungshalbleitermodul mit Kunststoffgehäuse und ein Verfahren zu seiner Herstellung anzugeben, bei dem unter Verzicht auf eine Hartvergußmasse die erforderliche Festigkeit der Anschlußelemente erzielt wird.

Diese Aufgabe wird durch ein Leistungshalbleitermodul gelöst, mit wenigstens einem Leistungshalbleiterbauelement, Anschlußelementen für nach außen führende elektrische Anschlüsse, und einem Kunststoffgehäuse, das im Inneren angeformte Führungselemente oder Ausnehmungen aufweist, die während der Modulherstellung als Lötform für die Anschlußelemente wirken, wobei die Anschlußelemente durch während der Modulherstellung ver-

formte Kunststoffteile im Bereich der Führungselemente oder Ausnehmungen mechanisch fest mit dem Kunststoffgehäuse verbunden sind.

Die Aufgabe wird außerdem durch ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Leistungshalbleitermoduls gelöst, das weiter unten beschrieben und im Anspruch 5 angegeben ist.

Die mit der Erfindung vorgeschlagene Art der Befestigung von Anschlußelementen am Kunststoffgehäuse hat den Vorteil, daß außer der Entlastung der Lötanschlüsse auch erreicht wird, daß mechanische Schwingungen, die in Anschlußleitungen auftreten können, wirksam über das Kunststoffgehäuse gedämpft werden. Außerdem läßt sich die Modulherstellung z.B. durch Automatisierung rationell durchführen. Weitere Vorteile und vorteilhafte Ausgestaltungsmöglichkeiten ergeben sich aus der nachstehenden Beschreibung eines in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels.

Es zeigen:

- Figur 1 ein erfindungsgemäßes Leistungshalbleitermodul in Explosionsdarstellung,
- Figur 2 ein mit Anschlußelementen bestücktes Modulgehäuse in Aufsicht,
- Figur 3 eine Anschlußlasche,
- Figur 4 einen Schnitt durch ein Modul vor Durchführung einer Ultraschall-Schweißung zur Befestigung einer Anschlußlasche,
- Figur 5 einen Schnitt durch ein Modul nach Durchführung der Ultraschall-Schweißung,
- Figur 6 einen Schnitt durch ein Kunststoffgehäuse mit eingesetzten Anschlußlaschen.

Figur 1 zeigt eine perspektivische Ansicht eines Leistungshalbleitermoduls 1 in Explosionsdarstellung. Es sind drei wesentliche Teile des Moduls 1 zu erkennen: Ein Kunststoffgehäuse 2 mit Anschlußlaschen 3, ein Gehäusedeckel 4 und ein Substrat 5 mit aufgelöteten Halbleiterbauelementen 6 und modulinternen Verbindungselementen 7. Die Laschen 3 stecken in Taschen oder Führungsschächten, die durch Führungselemente 8 im Inneren des Kunststoffgehäuses gebildet sind. Die Führungselemente 8 sind im dargestellten Beispiel zwei winkelförmige Anformungen an einer Innenwand im Modulgehäuse 2 mit einem Querbalken 16 zwischen den winkelförmigen Anformungen.

Ein Gehäusedeckel 4 ist nicht bei allen Modulvarianten erforderlich. Im dargestellten Beispiel ist jedoch ein Deckel 4 vorgesehen, der z.B. mittels Ultraschall-Schweißung mit dem Gehäuse 2 verbunden werden kann. Der Deckel 4 weist Schlitze 9 zur Durchführung der Anschlußlaschen 3 auf, sowie Vertiefungen 10 zur Aufnahme von Sechskantmuttern. Nach dem Einlegen der Muttern werden die

Anschlußlaschen 3 umbogen, so daß Anschlußschrauben durch ein Loch 13 der Laschen 3 gesteckt und in die Muttern geschraubt werden können.

Das Substrat 5 kann z.B. ein Keramiksubstrat sein, das Leiterbahnen 11 trägt und auf dem die Halbleiterbauelemente 6 aufgelötet sind. Auf den Leiterbahnen 11 sind mit Lot benetzte Anschlußflächen 12 für die Verlötung mit Anschlußlaschen 3 vorbereitet. Die Unterseite des Keramiksubstrats kann mit einer Metallschicht versehen sein.

Figur 2 zeigt ähnlich wie Figur 1 ein Kunststoffgehäuse 2 mit Anschlußlaschen 3. In das in Aufsicht dargestellte Gehäuse 2 sind drei Anschlußlaschen 3 eingesteckt. Auf der rechten Seite sind vier schmale Ausnehmungen 19 zu erkennen, in die Steueranschlußteile 20 (siehe Figur 6) eingesteckt und mittels Ultraschall verdämmt werden können.

In Figur 6 ist ein Modul entsprechend Modul 2 dargestellt, wobei ein Steueranschlußteil 20 gezeigt ist, das eine Schulter 22 hat, die etwas tiefer liegt als die obere Kante 23 eines Kunststoffteils 28. Der über die Schulter 22 ragende Kunststoff kann mit Hilfe einer Sonotrode im Ultraschallschweißverfahren in die Ausnehmungen 19 gedrückt werden, um das Steueranschlußteil 20 im Gehäuse 2 zu befestigen. In Figur 6 ist im übrigen ein Gehäuse 2 mit einer großen Öffnung 26 und einem Absatz 27 in der Bodenebene des Gehäuses dargestellt, in die ein Substrat 5 einsetzbar ist.

Sowohl in Figur 1 als auch in Figur 3, die eine Anschlußlasche 3 zeigt, sind weitere Einzelheiten zur Ausführung der Anschlußlaschen 3 dargestellt, nämlich Einkerbungen 14 und eine Ausbeulung 15. Die Einkerbungen 14 sind zur Aufnahme von Kunststoff vorgesehen, wie weiter unten zu Figur 4 und 5 erläutert wird. Die Ausbeulung 15 wirkt mit dem Querbalken 16 der Führungselemente 8 am Kunststoffgehäuse 2 zusammen. Der Querbalken 16 ist nachgiebig und ermöglicht somit beim Einstecken der Anschlußlaschen 3 von unten her in die Führungselemente 8 ein Einschnappen. Die Ausbeulung 15 verhindert anschließend während der weiteren Fertigungsschritte ein Herausfallen der Anschlußlasche 3 aus dem Führungsschacht.

Weiterhin ist an der Anschlußlasche 3 im unteren Bereich ein Laschenfuß 17 zu erkennen, der zur Verlötung mit den Anschlußflächen 12 auf dem Substrat 5 vorgesehen ist. Darauf folgt ein etwa parallel zur Substratebene verlaufendes Laschenstück 18, das kleine Zug- oder Druckbewegungen aufnehmen kann, die sich am fertigen Modul durch Temperaturwechselbelastungen ergeben können. In einem sich anschließenden vertikalen Teil 21 der Lasche 3 ist unten die als Rastnase wirkende Ausbeulung 15 zu erkennen und darüber die seitlichen Einkerbungen 14 und ganz oben das Loch 13 für

den Stromanschluß.

Das beschriebene und in der Zeichnung dargestellte Leistungshalbleitermodul kann in nachstehenden Verfahrensschritten hergestellt werden.

Zunächst werden drei Hauptkomponenten für den Zusammenbau vorbereitet: Das Substrat 5, das Gehäuse 2 und der Deckel 4. Das Substrat 5 wird mit Leistungshalbleiterchips 6 und modulinternen Verbindungselementen 7 bestückt und mittels Weichlot verlötet. Dabei werden die Anschlußflächen 12 für die Anschlußlaschen 3 ebenfalls mit Lot vorbenetzt.

In einem getrennten Arbeitsgang kann das Kunststoffgehäuse 2 bereits mit Anschlußlaschen 3 vorbestückt werden. Danach wird das Substrat 5 mittels eines elastischen Silikonklebstoffes in das unten offene Gehäuse 2 geklebt. Anschließend werden die Laschenfüße 17 der auf dem Substrat 5 aufliegenden Anschlußlaschen 3 mit dem Substrat 5 verlötet, z.B. durch eine sogenannte Impulslötung, bei der mittels eines beheizten Stempels unter äußerem Druck die Lötverbindung hergestellt wird. In der Regel wird im nächsten Schritt eine geringe Menge einer weichelastischen Silikonmasse, z.B. eines Gels, zum Schutz der Chips 6 und zur Herstellung der Isolationsfähigkeit zwischen Leiterbahnen 11 eingefüllt. In diesem Zustand sind oder wären die Lötverbindungen der Laschen noch Zug- und Druckkräften bzw. Scherkräften ausgesetzt, die von außen auf die Anschlüsse einwirken können. Um dies zu verhindern, wird - wie in Figur 4 und 5 dargestellt ist - mittels einer speziell geformten Ultraschallsonotrode 24 der Kunststoff eines oberen Teils 25 der Führungselemente 8 in die Einkerbungen 14 der Laschen 3 hineingedrückt. Dabei kommt es zu einer festen Verankerung der Laschen 3 im Gehäuse 2. Die Sonotrode 24 wird dabei senkrecht von oben nach unten bewegt. Die dargestellte Anschrägung an der Spitze der Sonotrode 24 ist dabei mit dem Kunststoffteil 25 in Kontakt. Figur 4 zeigt den Zustand der Führungselemente 8 vor der Ultraschallschweißung und Figur 5 den verformten oberen Teil 25 nach dem Schweißvorgang.

Zur Fertigstellung des Moduls 1 wird der Deckel 4 aufgesetzt. Die Laschen 3 werden dabei durch die Schlitze 9 im Deckel 4 geführt. In die Vertiefung 10 des Deckels 4 werden Muttern eingelegt und die Laschen 3 werden anschließend darüber um 90° umgebogen, so daß die Muttern nicht mehr herausfallen können.

Wie bereits erwähnt, können Module mit Steuer- oder Hilfsanschlüssen auf ähnliche Weise hergestellt werden. In diesem Fall wird die in Figur 6 dargestellte obere Kante 23 von Kunststoffteilen im Bereich der Ausnehmungen 19 mit Hilfe einer Sonotrode verformt, so daß der Kunststoff über der Schulter 22 der eingesetzten Steueranschlußteile

20 in die Ausnehmung 19 gedrückt wird.

Die Erfindung ist nicht auf Module mit einem Keramiksubstrat als Boden beschränkt, sondern kann auch bei Modulen mit einem z.B. 3 bis 10 mm dicken Metallboden angewendet werden.

Die oben beschriebene Folge von Fertigungsschritten wird bevorzugt, weil die Fixierung der Anschlußlaschen 3 am Gehäuse 2 erst nach der Befestigung des Substrats 5 am Gehäuse 2 und nach dem Verlöten der Laschen 3 mit dem Substrat 5 erfolgt und somit Fertigungstoleranzen ohne weiteres ausgeglichen werden können. Wenn die einzelnen Montageschritte mit ausreichend kleinen Toleranzen durchgeführt werden, ist auch eine Befestigung der Anschlußlaschen 3 am Gehäuse 2 sofort nach der Bestückung des Gehäuses 2 möglich. Besonders dann sind auch alternative Befestigungsarten zum Ultraschallschweißen anwendbar, wie z.B. eine thermoplastische Verformung von Kunststoffteilen.

Bezugszeichenliste

	1	Leistungshalbleitermodul
	2	Kunststoffgehäuse
	3	Anschlußlasche
	4	Gehäusedeckel
	5	Substrat
	6	Leistungshalbleiterbauelement
	7	modulinternes Verbindungselement
	8	Führungselement
	9	Schlitz
	10	Vertiefung
	11	Leiterbahn
	12	Anschlußfläche
	13	Loch
	14	Einkerbung
	15	Ausbeulung
	16	Querbalken
	17	Laschenfuß
	18	Laschenstück
	19	Ausnehmung
	20	Steueranschlußteil
	21	vertikaler Teil
	22	Schulter
	23	obere Kante
	24	Sonotrode
	25	oberer Teil der Führungselemente
	26	Öffnung
	27	Absatz
	28	Kunststoffteil

Patentansprüche

1. Leistungshalbleitermodul mit
 - wenigstens einem Leistungshalbleiterbauelement,
 - Anschlußelementen für nach außen füh-

- rende elektrische Anschlüsse, und
- einem Kunststoffgehäuse, das im Inneren angeformte Führungselemente oder Ausnehmungen aufweist, die während der Modulherstellung als Lötform für die Anschlußelemente wirken,

dadurch gekennzeichnet, daß die Anschlußelemente (3,20) durch während der Modulherstellung verformte Kunststoffteile (25,28) im Bereich der Führungselemente (8) oder Ausnehmungen (19) mechanisch fest mit dem Kunststoffgehäuse (2) verbunden sind.

2. Leistungshalbleitermodul nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Anschlußelemente Anschlußlaschen (3) mit Einkerbungen (14) eingesetzt sind, wobei in die Einkerbungen (14) durch Ultraschall-Schweißung verformte Kunststoffteile (25) gedrückt sind.

3. Leistungshalbleitermodul nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Anschlußlaschen (3) eine als Rastnase wirkende Ausbeulung (15) aufweisen, mit deren Hilfe die Anschlußlaschen (3) jeweils in einen elastischen Querbalken (16) an den Führungselementen (8) einrastbar sind.

4. Leistungshalbleitermodul nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Kunststoffgehäuse (2) in seiner Bodenebene eine Öffnung (26) mit einem Absatz (27) aufweist, in die ein keramisches Substrat (5) eingesetzt ist, wobei das Substrat (5) auf beiden Hauptflächen eine Metallschicht tragen kann.

5. Verfahren zur Herstellung eines Leistungshalbleitermoduls, gekennzeichnet durch nachstehende Schritte:

a) Bereitstellung eines Substrats (5) als Modulboden, eines Kunststoffgehäuses (2) und eines Gehäusedeckels (4);

b) Bestücken des Substrats (5), das Leiterbahnen (11) aufweist, mit Leistungshalbleiterbauelementen (6) und Verbindungselementen (7);

c) Verlöten des bestückten Substrats (5) mittels Weichlot, wobei auch Anschlußflächen (12) für Anschlußlaschen (3) mit Lot benetzt werden,

d) Bestücken des Kunststoffgehäuses (2) mit Anschlußelementen (3,20), die in Führungsschächte gesteckt werden, die durch angeformte Führungselemente (8) an den Innenwänden des Kunststoffgehäuses (2) bzw. durch Ausnehmungen (19) im Gehäuse (2) gebildet sind;

e) Verbinden des Gehäuses (2) mit dem Substrat (5) durch Verkleben;

f) Verbinden der Anschlußlaschen (3) mit dem Substrat (5) mittels Weichlöten, vorzugsweise mittels Impulslöten;

g) Herstellen einer festen Verbindung zwischen dem Kunststoffgehäuse (2) und den Anschlußelementen (3,20) durch Ultraschall-Schweißen, wobei ein oberer Kunststoffteil (25) der Führungselemente (8) von einer Sonotrode (24) in Einkerbungen (14) der Anschlußlaschen (3) gedrückt wird bzw. ein Kunststoffteil (29) in die Ausnehmung (19) gedrückt wird und

h) Aufsetzen und Verbinden des Gehäusedeckels (4), der Schlitze (9) zur Durchführung der Anschlußelemente (3,20) aufweist.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß nach dem Ultraschall-Schweißen des Verfahrensschritts g) eine kleine Menge Weichvergußmasse in das Modul gefüllt wird.

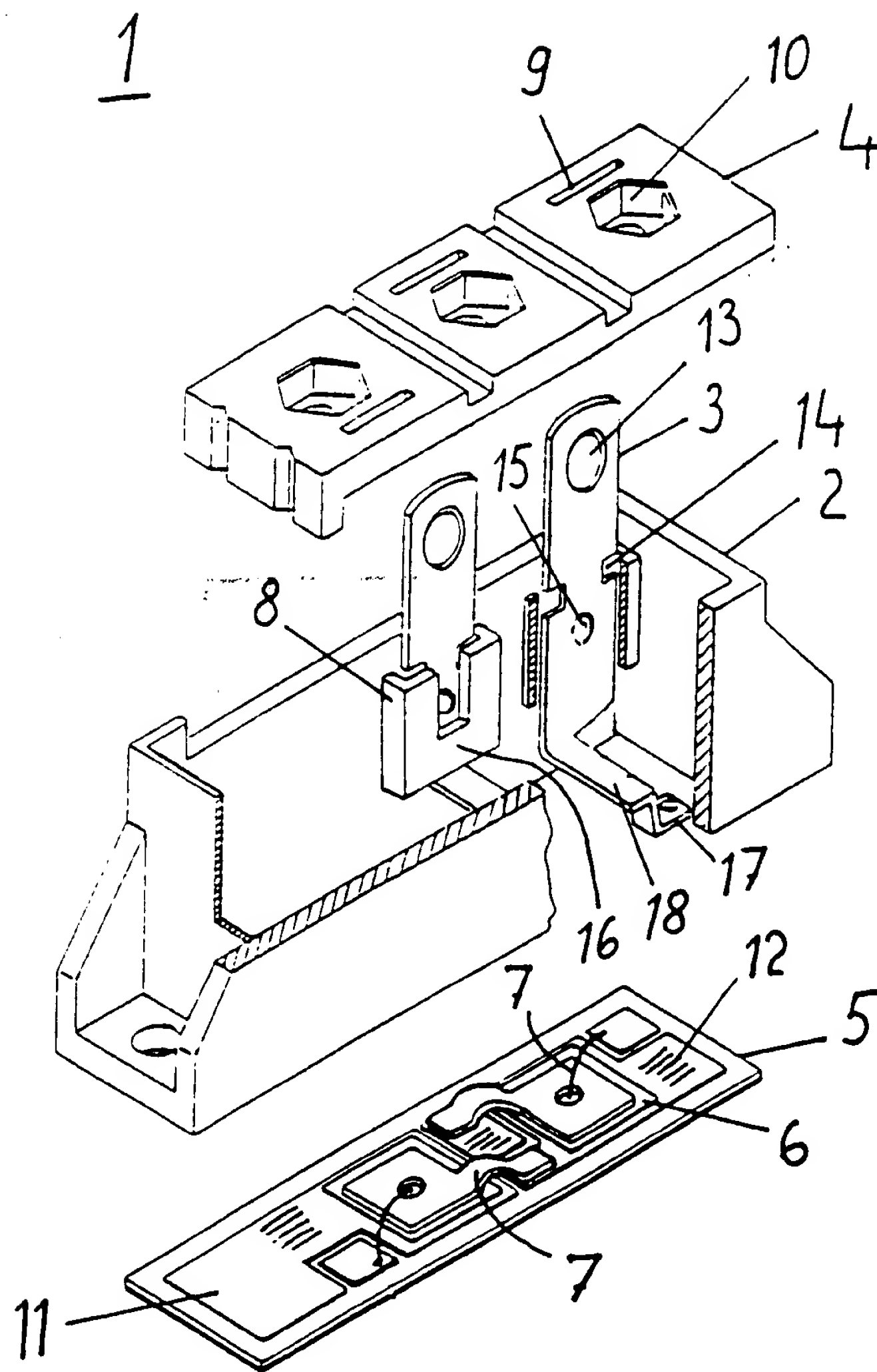
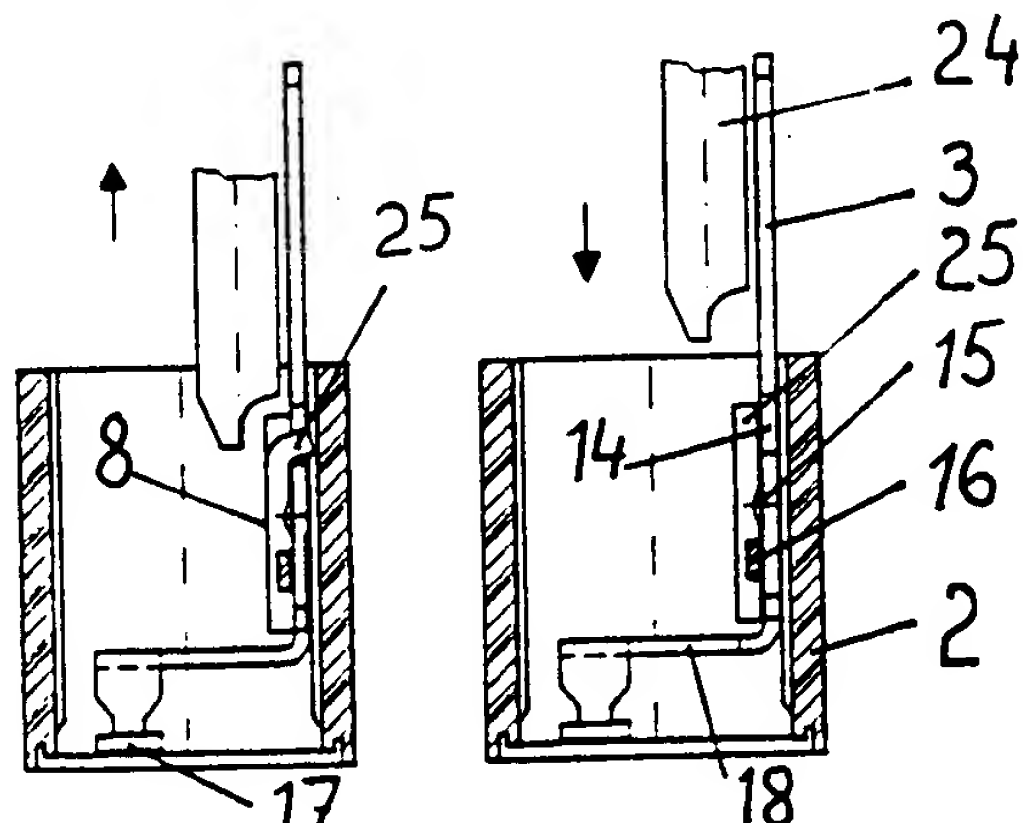
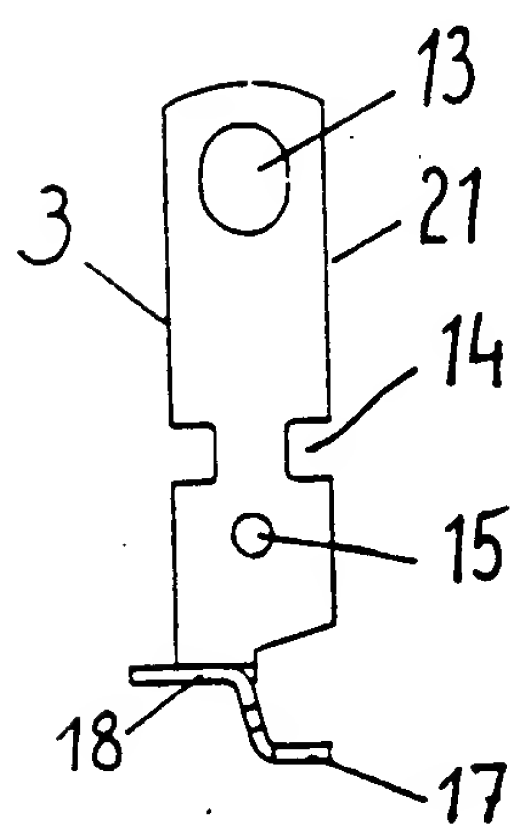
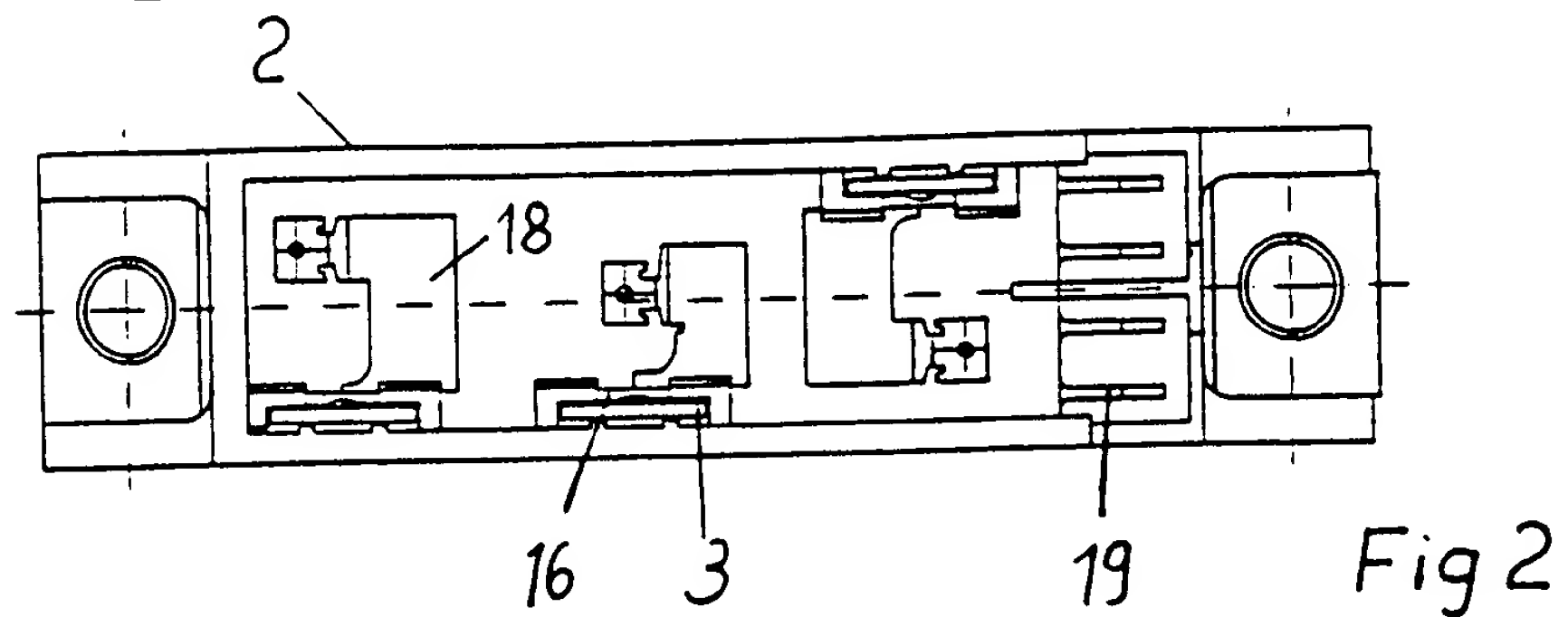
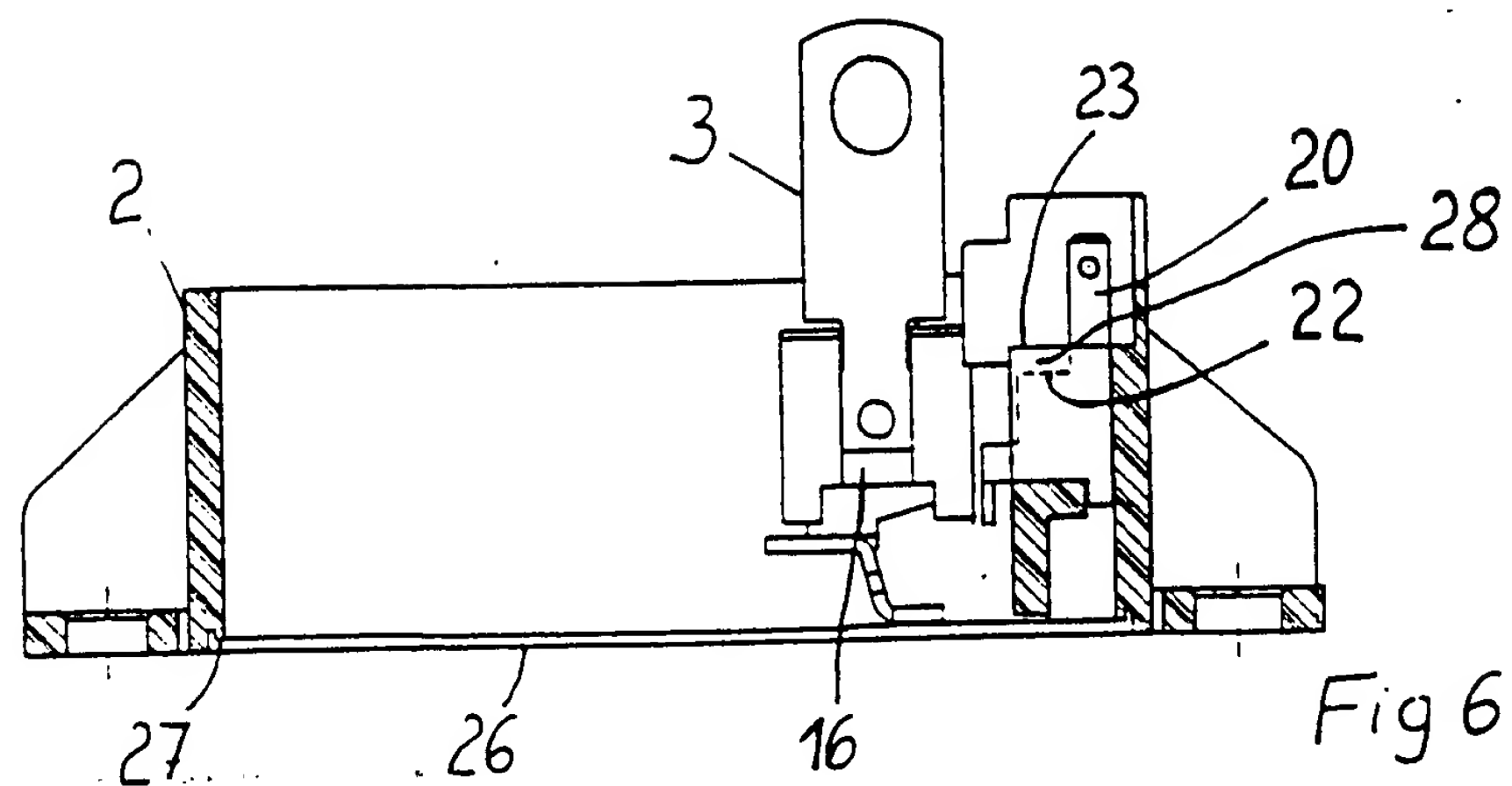


Fig 1





Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 91 10 7831

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int. Cl.5)
D, A	EP-A-0 292 848 (BROWN, BOVERI & CIE) * Ansprüche 1, 3, 8 *	1, 4, 5	H01L25/07 H01L21/50
A	US-A-4 630 174 (L. R. KAUFMAN) * Anspruch 1 *	1, 4	
A	FR-A-2 535 898 (BROWN, BOVERI & CIE) * Anspruch 1; Abbildungen 1, 3 *	1, 2, 4	
A	EP-A-0 138 048 (TOSHIBA)		
A	EP-A-0 237 739 (BROWN, BOVERI & CIE)		
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int. Cl.5)
			H01L
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschließdatum der Recherche 09 JANUAR 1992	Prüfer DE RAEVE R. A. L.
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 (01.92) (P0003)

Docket # GR 97P 1593P

Applic. #

Applicant: Lennier et al